



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

Determinación experimental de la influencia de la geometría de la unión
en las propiedades mecánicas de barras de madera conífera reconstruidas.

Autor:

Stefano Soto Innocenti

Tutor académico:

Javier Benlloch Marco

Trabajo final de máster en Edificación

Programa: Rehabilitación de Estructuras

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

Noviembre de 2020

ETS de Ingeniería de Edificación

Universitat Politècnica de València

Índice general

Índice general.....	3
Índice de tablas, figuras y gráficos	5
Agradecimientos	7
Resumen.....	8
<i>Abstract</i>	9
1. Introducción	10
2. Objetivos y Delimitación de la investigación.....	20
2.1. Objetivos de la investigación.....	20
2.2. Delimitación de la investigación.....	20
2.2.1. Delimitación temporal.....	20
2.2.2. Delimitación espacial	20
2.2.3. Delimitación científica.....	20
2.3. Tipos de unión bajo estudio:	21
3. Plan Experimental	22
3.1. Equipo humano y emplazamiento	22
3.2. Equipo material	22
3.2.1. Materiales e Instrumentos utilizados en el proceso	22
3.2.2. Maquinaria para los ensayos.....	23
3.3. Material a ensayar.....	23
3.4. Metodología general y desarrollo	23
3.4.1. Investigación y estudio bibliográfico.....	24
3.4.2. Técnicas aplicadas en el estudio	24
5. Análisis de resultados de ensayos.....	28
5.1. Síntesis de resultados obtenidos por grupo de perfiles.....	31
5.1.1. Perfiles sin corte (S).....	31
5.1.2. Perfiles con unión recta o perpendicular (R).....	32
5.1.3. Perfiles con unión a 45 grados (Q)	32
5.1.4. Perfiles con unión dentada simple (V)	32
5.1.5. Perfiles con unión a quijera (T)	32
5.1.6. Perfiles con unión dentada doble (W)	33
5.2. Comparativa de resultados por ítem bajo estudio:	33
5.2.1. Comparativa de fuerza máxima resistida en kilonewton.....	33
5.2.2. Comparativa de presión máxima resistida en megapascals	33

5.2.3. Comparativa de fuerza por desplazamiento en kilonewton/milímetros	34
5.2.4. Comparativa de módulo elástico global en flexión en magapascals	34
5.2.5. Comparativa de módulo elástico local en flexión en magapascals.....	34
5.3. Análisis visual del comportamiento de las muestras y los ensayos	34
6. Conclusiones y recomendaciones	37
Bibliografía	38
ANEXOS	44
A.1. Fotos de proceso de encolado y unión de elementos	44
A.2. Fotos de ensayos de flexión axial aplicado en dos puntos	45
A.3. Tabla de Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ mm.....	48
A.4. Cálculo de valor característico para pequeñas muestras (apuntes clase de intervención en estructura de hormigón. Capítulo III, Página 14, Prof. Javier Benlloch Marco)	49

Índice de tablas, figuras y gráficos

Tablas

Tabla 1. Resultados generales de perfiles ensayados sin corte	26
Tabla 2. Resultados generales de perfiles ensayados con unión recta o perpendicular	26
Tabla 3. Resultados generales de perfiles ensayados con unión a 45 grados	26
Tabla 4. Resultados generales de Perfiles ensayados con unión dentada simple	27
Tabla 5. Resultados generales de perfiles ensayados con unión a quijera	27
Tabla 6. Resultados generales de perfiles ensayados con unión dentada doble.....	27
Tabla 7. Media de resultados generales de perfiles ensayados por grupo.....	28
Tabla 8. Valores estadísticos generales de perfiles ensayados por grupo.....	31
Tabla 9. Superficies de contacto de piezas encoladas por grupo	35

Figuras

Fig. 1. Cubierta de la Iglesia de Santa María de Calatañazor (Almazán, Soria)	10
Fig. 3. Pabellón de Chile, Expo Milán 2015 (Temuco, Chile)	10
Fig. 2. Casa de la Madera (Revenga, Burgos)	10
Fig. 4. Metropol Parasol o Setas de Sevilla.....	10
Fig. 5. Diferencia entre maderas coníferas y Latifoliadas	11
Fig. 6. Estructura anatómica de una madera conífera	11
Fig. 7. Sección de un árbol.....	11
Fig. 8. Entramado de piezas de madera aserrada estructural	11
Fig. 9. Nudos sueltos	12
Fig. 10. Rajaduras	12
Fig. 11. Grietas o fendas.....	12
Fig. 12. Gemas o canto muerto	12
Fig. 13. Acebolladuras	12
Fig. 14. Madera con y sin mantención contra agentes externos	13
Fig. 15. Madera con presencia de pudrición seca.....	13
Fig. 16. Madera con presencia de hongos.....	13
Fig. 17. Degradación de la madera.....	13
Fig. 18. Piezas de madera machihembrada de Pino Radiata, la que fue atacada por hongos cromógenos estando encastillada.....	13
Fig. 19. Estructura anatómica de una especie conífera con hongos que se alimentan de la pared celular	14
Fig. 20. Pieza 1 atacada por hongos de pudrición.....	14

Fig. 21. Pieza 2 atacada por hongos de pudrición.....	14
Fig. 22. Insecto cerambícido que ataca la madera.....	15
Fig. 23. El líctido sólo ataca latifoliadas.....	15
Fig. 24. El anóbido se alimenta de celulosa y lignina	15
Fig. 25. En la imagen se observan termitas subterráneas en pleno ataque a una solera de un tabique	15
Fig. 26. En la imagen se observan termitas de madera seca en pleno ataque a una pieza	16
Fig. 27. Madera oscurecida, degradación por la luz.....	16
Fig. 28. Madera degradada por la humedad.....	16
Fig. 29. La capa de carbón producto de la acción del fuego	17
Fig. 30. Comportamiento de la madera frente a la acción del fuego.	17
Fig. 31. Estructura de madera afectada por la acción del fuego.....	17
Fig. 32. Capa exterior de pieza de madera carbonizada	17
Fig. 33. Estructura de madera carbonizada por la acción del fuego.....	18
Fig. 34. Vigas de madera carbonizadas por la acción del fuego.....	18
Fig. 35. Unión simple entre caras.....	21
Fig. 36. Unión simple entre caras.....	21
Fig. 37. Unión simple a 45º	21
Fig. 38. Unión simple a 45º	21
Fig. 39. Unión dentada simple.....	21
Fig. 40. Unión dentada simple.....	21
Fig. 41. Unión de quijera	21
Fig. 42. Unión de quijera	21
Fig. 43. Unión dentada doble	21
Fig. 44. Unión dentada doble	21
Fig. 45. Dispositivo de ensayo de flexión axial.....	25
Fig. 46. Encolado unión tipo (T).....	35
Fig. 47. Encolado unión tipo (Q).....	35
Fig. 48. Encolado unión tipo (V).	35
Fig. 49. Perfil ensayado con unión a quijera (T) que presenta rajadura.	36

Gráficos

Gráfico 1. Fuerza máxima soportada a la carga aplicada en kN.	28
Gráfico 2. Presión máxima soportada a la carga aplicada en Mpa.	29
Gráfico 3. Esfuerzo por deformación máximo en kN/mm.	29
Gráfico 4. Módulo elástico global en flexión máximo en Mpa.	29
Gráfico 5. Módulo elástico local en flexión máximo en Mpa.....	30

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este proceso, desde la idea inicial de investigación, hasta la culminación de esta.

Agradezco la orientación, el esfuerzo y el apoyo del personal profesional y docente recibido por el personal del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la UPV y por el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPV, específicamente a Rafael Calabuig Pastor Técnico Superior del Laboratorio y a mi tutor del trabajo final de máster Javier Benlloch Marco, por su dedicación, tiempo, disponibilidad, guía y aportaciones, y sobre todo por su confianza en la presente investigación y a mí como estudiante e investigador.

También agradezco a la Univesitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación por los conocimientos, recursos materiales e instalaciones gracias a los cuales pude realizar la investigación, crecer como persona y como profesional.

Por último, a mis padres Marlene Innocenti y Jaime Soto, por todo su esfuerzo en la crianza y la educación brindada, así como su apoyo en todas las decisiones y fases de mi vida.

Resumen

El presente trabajo recoge el planteamiento inicial, plan de ensayos, resultados, análisis y conclusiones de la investigación realizada en la aplicación del sistema BETA de rehabilitación de vigas de madera para evaluar distintas geometrías de unión con cola y su comportamiento.

El principal objetivo es determinar el comportamiento de las geometrías de unión bajo estudio, determinando cuales son las más adecuadas para la unión de secciones de madera; todo esto para ofrecer un método de rehabilitación de vigas que presenten deterioro o degradación en algún área o segmento de la pieza, sustituyendo el tramo afectado por otro nuevo, unido simplemente con cola, sin la aplicación de fibra de vidrio o uniones metálicas. Para ello se seleccionaron piezas de madera nueva de *Pinus Sylvestris*, empleando clasificación visual, posteriormente se ensayaron mediante la aplicación de fuerza en dos puntos (ensayo de flexión axial).

Los resultados obtenidos permitieron comparar y valorar diferentes parámetros de comportamiento de los tipos de unión ensayados. Estos resultados demostraron las distintas opciones de unión útiles para la rehabilitación de vigas de madera. Finalmente, se proponen futuras líneas de investigación.

Abstract

The present work collects the initial approach, test plan, results, analysis and conclusions of the research carried out in the application of the BETA system for the rehabilitation of wooden beams to evaluate different geometries of glue connection and their behavior.

The main objective is to determine the behavior of the joint geometries under study, determining which are the most suitable for joining wood sections; all this to offer a method of rehabilitation of beams that show deterioration or degradation in some area or segment of the piece, replacing the affected section with a new one, simply joined with glue, without the application of fiberglass or metal joints. For this, pieces of new *Pinus Sylvestris* wood were selected, using visual classification, later they were tested by applying force at two points (axial bending test).

The results obtained allowed the comparison and evaluation of different performance parameters of the types of union tested. These results demonstrated the different joint options useful for the rehabilitation of wooden beams. Finally, future lines of research are proposed.

1. Introducción

Justificación de la Tesis

A lo largo de la historia de la humanidad se ha utilizado una amplia variedad de materiales para la construcción de edificaciones, la selección y aplicación de los mismos ha dependido en gran proporción de la ubicación geográfica, características climáticas, entre otros factores; pero uno de los elementos que ha sido utilizado desde los inicios de la construcción por los seres humanos, es la madera, dada su abundancia, fácil trabajabilidad, características físico-mecánicas adecuadas para su uso como cualquier tipo de elemento estructural (Figuras 1 y 2), además de ser un excelente aislante térmico y acústico.

Por muchos motivos la madera ha sido un material atractivo para su uso en la edificación, en la arquitectura moderna ha tenido que competir con dos materiales de construcción usuales como lo son el hormigón y el acero, pero en muchos aspectos como la simple comparación de los pesos propios de los sistemas constructivos tradicionales pesados (forjados de viguetas y hormigón armado) con los entramados ligeros de madera revela una diferencia abismal en relaciones resistencia/peso (Figuras 3 y 4). La construcción ligera en madera tiene un peso propio de un orden siete veces inferior al sistema tradicional pesado. En un forjado pesado la estructura pesa casi lo mismo que la carga que resiste, mientras que en uno de madera su peso no suele llegar al 20% de la carga soportada. Aún resulta más sorprendente la eficacia energética de los sistemas constructivos de madera frente a otros materiales estructurales (Arriaga, F. 1995).

En la actualidad existen diferentes tipos de madera, según su clasificación comercial podemos encontrar: Madera aserrada y cepillada maciza, molduras de madera, maderas reconstruidas, maderas laminadas y perfiles o secciones prefabricados. La más usual desde los inicios de la utilización de este material hasta la actualidad, es la madera aserrada maciza.



Fig. 1. Cubierta de la Iglesia de Santa María de Calatañazor (Almazán, Soria).



Fig. 2. Casa de la Madera (Revenga, Burgos).



Fig. 3. Pabellón de Chile, Expo Milán 2015 (Temuco, Chile).



Fig. 4. Metropol Parasol o Setas de Sevilla (Sevilla, España).

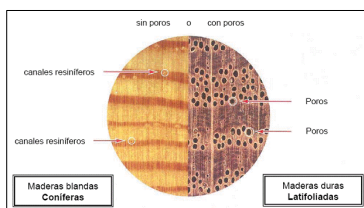


Fig. 5. Diferencia entre maderas coníferas y Latifoliadas. (GESTIBERIAN, 2016).

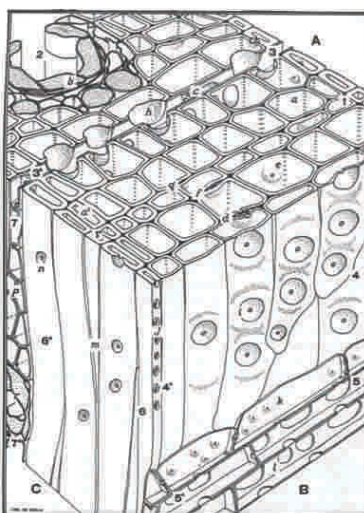


Fig. 6. Estructura anatómica de una madera conífera. (CORMA, 2001).

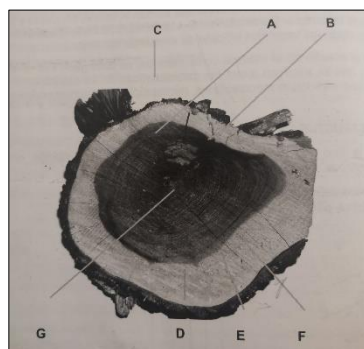


Fig. 7. Sección de un árbol. (Materiales Orgánicos Madera, 2005).



Fig. 8. Entramado de piezas de madera aserrada estructural. (CONFEMADERA, 2010).

La utilización de la madera aserrada en estructuras requiere caracterizar el material mediante la determinación fiable de sus propiedades mecánicas y otras características relacionadas con su comportamiento al fuego y su durabilidad que se deben tener en cuenta en el proyecto de la estructura.

Existen diferentes especies de madera que crecen en circunstancias muy dispares y que, a su vez, presentan diferentes singularidades naturales como nudos, gemas, fendas, entre otros., por lo que se trata de un material muy heterogéneo (Arriaga, F. et al., 2003).

La madera es producto de un proceso metabólico en un organismo vivo (árbol), que crece en la naturaleza en condiciones climáticas, geográficas y de suelos muy diversos. Esta diversidad afecta el crecimiento y las características de la madera en relación con su estructura celular.

Al analizar una probeta en microscopio se observa la madera igual a cualquier ser vivo, conformada por células generalmente alargadas y dispuestas en la dirección del eje del árbol, pudiendo cumplir esencialmente 2 funciones: sostén del propio árbol y conductora de savia. Por esto, a nivel de estructura celular se pueden clasificar las especies arbóreas en dos grandes grupos de árboles (Figura 5): Coníferas y Latifoliadas (CORMA, 2001).

En esta investigación nos centraremos en la familia de las maderas coníferas (Figura 6). La madera de coníferas está constituida esencialmente por células de características homogéneas, del grupo traqueidas, las cuales realizan la doble función de sostén del árbol y conducción de la savia (NCh 173 Madera – Terminología General). Las especies pertenecientes a este grupo presentan un tronco recto, cónico hasta su ápice (extremo superior) y revestido de ramas.

Analizando la estructura macroscópica de un árbol y realizando un corte transversal o “de testa” podemos observar que la sección transversal está compuesta por las siguientes partes: Médula (A), Duramen (B), Albura (C), Corteza (D), Líber (E), Cambium (F) y Radios medulares (G) (Figura 7).

De estas secciones se extraen las piezas de madera aserrada (Figura 8), dichas piezas se utilizan principalmente en estructuras de luces pequeñas (4 a 6 m) y medias (6 a 17 m) formando una estructura completa o como parte de ella en los sistemas mixtos formados por muros de fábrica con forjados y cubierta de madera (CONFEMADERA, 2010).

A la hora de trabajar con la madera es muy relevante tener presente que existe una serie de variables relacionadas con la estructura natural de la madera que pueden afectar sus propiedades mecánicas, una de ellas son los defectos propios de la madera, recibe este nombre cualquier irregularidad física, química o físico-química de la madera, que afecte los aspectos de resistencia o durabilidad, determinando generalmente una limitante en su uso o aplicación.

El identificar los defectos de la madera permite clasificarla por aspecto o resistencia.

Es importante conocer dichos defectos de la madera a la hora de seleccionar piezas para ser utilizadas como elementos constructivos, los defectos propios que más inciden sobre las propiedades de resistencia y durabilidad que podemos encontrar en las piezas de madera son (CORMA, 2001):

- **Nudos sueltos:** Abertura de sección relativamente circular, originada por el desprendimiento de un nudo. La posición de este defecto es determinante en la magnitud de la alteración que causará en las propiedades resistentes (Figura 9).
- **Rajaduras:** Separación de fibras en la madera que afecta dos superficies opuestas o adyacentes de una pieza (Figura 10).
- **Grietas o fendas:** Separación de elementos constitutivos de la madera, cuyo desarrollo no alcanza a afectar dos superficies opuestas o adyacentes de una pieza (Figura 11).
- **Gemas o canto muerto:** Arista faltante a la falta de madera en una o más aristas de una pieza (Figura 12).
- **Acebolladuras:** Separación de la pieza entre dos anillos consecutivos en la sección transversal del tronco; o dicho de otra forma, a toda raja longitudinal que se extiende tangencialmente al anillo (Figura 13).



Fig. 9. Nudos sueltos (CORMA, 2001).

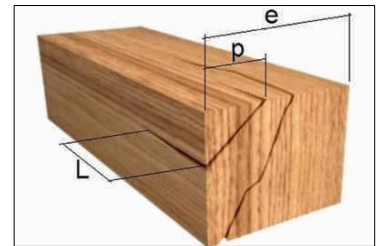


Fig. 10. Rajaduras (CORMA, 2001).

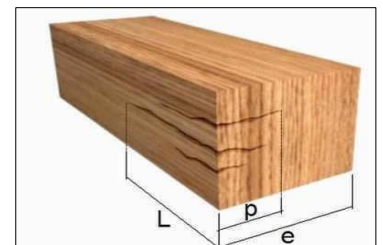


Fig. 11. Grietas o fendas (CORMA, 2001).

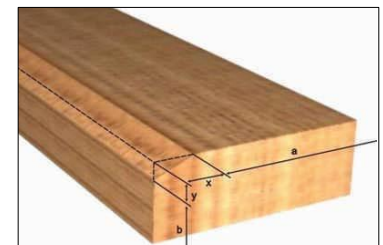


Fig. 12. Gemas o canto muerto (CORMA, 2001).



Fig. 13. Acebolladuras (CORMA, 2001).



Fig. 14. Madera con y sin mantención contra agentes externos (CORMA, 2001).



Fig. 15. Madera con presencia de pudrición seca.



Fig. 16. Madera con presencia de hongos.



Fig. 17. Degradación de la madera. (CORMA, 2001).



Fig. 18. Piezas de madera machihembrada de Pino Radiata, la que fue atacada por hongos cromógenos estando encastillada. (CORMA, 2001).

Otro factor importante para tener en cuenta que afecta a la madera por el hecho de ser materia orgánica, susceptible al ataque de seres vivos que pueden provocar su total degradación, a la acción de agentes bióticos que pueden destruirla o degradarla y al tratamiento necesario en función de los requerimientos de durabilidad a que vaya a estar expuesta la madera en servicio o encastillada para ser montada y formar parte de una estructura de una vivienda de madera.

Por estas razones, la imagen generalizada que se tiene de la madera es de un material poco durable. La verdad es que sólo en parte se puede afirmar que es así, ya que, si se analiza que frente al oxígeno del aire la madera no reacciona, como sucede con los metales que se oxidan, o que es muy poco sensible a la luz que degrada los plásticos, se puede concluir que la madera es prácticamente inalterable por los agentes físicos del medio ambiente.

Por otro lado, con respecto a la presencia de insectos y hongos (agentes bióticos), la madera no es susceptible de ser atacada en todas las condiciones, existen soluciones arquitectónicas que permiten evitarlo, entre otras formas.

La idea de durabilidad que se tiene de otros materiales es difícil compararla con la de la madera. Si bien la madera se degrada, se debe tener presente en qué condiciones esto ocurre, ya que existen un sinnúmero de protectores que garantizan su durabilidad (CORMA, 2001).

Las causas **bióticas** que afectan a la madera se dividen en dos grandes familias: organismos xilófagos vegetales y organismos xilófagos del reino animal (Capuz, R., 2005).

a) Organismos Xilófagos vegetales

- *Hongos cromógenos*: Se caracterizan por alimentarse de las células vivas de la madera. El efecto importante que producen es un cambio de coloración, la madera toma un color azulado, pero en general no afecta a su resistencia, dado que no altera la pared celular.

Según lo expuesto, una madera azulada no debería depreciarse más que por su aspecto, pero la realidad es que el hecho de presentar dicha coloración es signo de que la madera ha estado expuesta a condiciones favorables para el desarrollo de hongos de pudrición (CORMA, 2001).

- *Hongos de pudrición:* en este caso los hongos se alimentan de la pared celular, causando una severa pérdida de resistencia, impidiendo cualquier tipo de aplicación, ya que la madera puede desintegrarse por la simple presión de los dedos. En un ataque de pudrición se suelen desarrollar muchos tipos de hongos, cada uno de los cuales actúa en un determinado intervalo de degradación, dependiendo si el hongo se alimentó de la lignina o de la celulosa.

La pudrición blanca es causada por hongos que se alimentan de la lignina, dejando la celulosa de color blanco. En este caso la madera se rompe en fibras, por lo que también se denomina pudrición fibrosa.

La pudrición parda es causada por hongos que se alimentan de la celulosa dejando la lignina, caracterizada por su color pardo. La madera se desgrana en cubos, por lo que también se le conoce como pudrición cúbica (CORMA, 2001).

- *Mohos:* son hongos que tienen una apariencia de algodón fino. La extensión de estos depende fundamentalmente de la temperatura y de una humedad abundante. Afectan a la madera en su aspecto superficial y se pueden eliminar cepillando la pieza, no causan daños a la resistencia ni a otras propiedades. Si no se eliminan oportunamente puede que la pieza de madera sea fácilmente atacada por hongos de pudrición, ya que el crecimiento de mohos estimula su desarrollo (CORMA, 2001).
- *Bacterias y actinomicetos:* las bacterias o “microbios” como se dice en general, son elementos de disgregación. Atacan a la celulosa de la madera de forma enzimática, transformando la celulosa en clobiosa y después en hidrógeno, metano, anhídrido carbónico y ácidos grasos. Los actinomicetos son organismos unicelulares filamentosos que destruyen la celulosa, se les considera intermedios entre las bacterias y los hongos (Capuz, R., 2005).

b) Organismos Xilófagos del Reino animal: Existe una gran cantidad de insectos que usan la madera para reproducirse y vivir y se alimentan de la celulosa que ésta contiene. El daño se produce debido a que sus larvas, orugas y adultos abren galerías en la madera para obtener alimento y protección. Dentro de estos insectos figuran los siguientes:

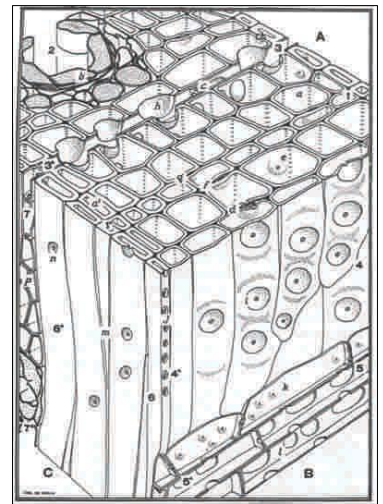


Fig. 19. Estructura anatómica de una especie conífera con hongos que se alimentan de la pared celular. (CORMA, 2001).



Fig. 20. Pieza 1 atacada por hongos de pudrición. (CORMA, 2001).

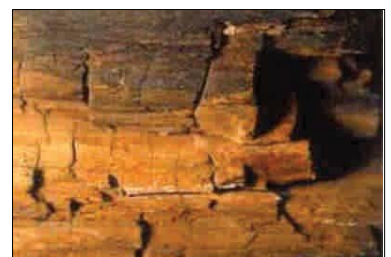


Fig. 21. Pieza 2 atacada por hongos de pudrición. (CORMA, 2001).



Fig. 22. Insecto cerambícido que ataca la madera. (CORMA, 2001).



Fig. 23. El líctido sólo ataca latifoliadas. (CORMA, 2001).



Fig. 24. El anóbido se alimenta de celulosa y lignina. (CORMA, 2001).



Fig. 25. En la imagen se observan termitas subterráneas en pleno ataque a una solera de un tabique. (CORMA, 2001).

- *Coleópteros*: los coleópteros xilófagos pueden ser agrupados en tres categorías (CORMA, 2001):
 - Insectos que requieren un contenido de humedad en la madera mayor al 20%, siendo la familia más importante los *Cerambícidos*, cuyas larvas se alimentan de almidón, azúcares y sustancias albuminoideas de la madera. La mayoría ataca a los árboles en pie y un número reducido de especies invade la madera que se encuentra encastillada, tanto de coníferas como latifoliadas.
 - Insectos que atacan maderas parcialmente secas (menos del 18 % de humedad), siendo la albura habitualmente la zona afectada. A este grupo pertenecen los *Líctidos*, que se caracterizan porque las larvas se alimentan del almidón contenido en la pared celular. No atacan a las coníferas, solamente a las latifoliadas.
 - Insectos que atacan a las maderas secas, tanto coníferas como latifoliadas, y que pertenecen a la familia de los *Anóbidos*, comúnmente llamados Carcoma, que se alimentan a expensas de la celulosa y lignina. Su tamaño es relativamente pequeño, con una longitud desde 2,5 mm hasta 8,5 mm y practica galerías de unos 2 a 3 mm de diámetro, dejando tras de sí un aserrín un poco menos fino que el de los Líctidos.
- *Termitas*: Son los ataques de estos insectos los que pueden causar mayores daños a la estructura de madera de una vivienda (CORMA, 2001). Se pueden dividir en dos grupos:
 - *Termitas subterráneas*: viven en grandes colonias en el suelo fuera de los edificios atacados. Su nido está fuera de la madera, pero forman nidos secundarios, construyen galerías subterráneas hasta alcanzar el edificio, creando ramificaciones “chimeneas” hasta la madera. Estas chimeneas permiten conservar un alto contenido de humedad y no dejar pasar la luz, estando construida de excrementos terrosos y deyecciones. Destruyen las partes más blandas de ésta, prefiriéndola algo húmedo e incluso atacado por hongos. Las galerías de la madera las efectúan en la dirección de las fibras, dejando una delgada capa externa intacta que les oculta del exterior, al mismo tiempo dificultando su detección (Capuz, R., 2005).

- *Termitas de madera seca*: Pueden destruir toda una estructura sin que se note el exterior, porque dejan una fina capa de 1 ó 2 mm de espesor en la superficie e incluso taponan los orificios de entrada. Prefiere también la zonas blandas y húmedas (Capuz, R., 2005).

Por otra parte, las causas **abióticas** de destrucción o degradación que afectan a las estructuras de madera son (CORMA, 2001):

- **Degradación por la luz**: el espectro ultravioleta de la luz descompone la celulosa de la madera produciendo su degradación. La acción de la luz es lenta y a medida que transcurre el tiempo la degradación no aumenta, dado que los primeros milímetros afectados sirven de protección al resto. Así, los efectos de la luz se hacen visibles entre el primer y el séptimo año y la madera cambia de color, oscureciéndose o aclarándose, según el grado de exposición en que se encuentre. La degradación afecta los primeros milímetros de la madera, con mayor intensidad las zonas de primavera que las de otoño, y más la albura que el duramen.

La degradación por la luz es más rápida si se combina con el deslavado que puede producir la lluvia, que arrastra la celulosa descompuesta de la superficie, produciendo la degradación denominada “madera meteorizada”. El espectro infrarrojo afecta en la medida que calienta la madera, aumentando su incidencia cuanto mayor sea su exposición al sol y más oscura sea. Este calor puede producir secado y con ello merma de la madera, y por ende, agrietamientos en dirección de las vetas por las cuales penetra la humedad, favoreciendo la invasión de los hongos xilófagos.

- **Humedad atmosférica**: La humedad atmosférica produce deterioro por los repetidos cambios de dimensiones que se producen en las capas superficiales de las piezas que se encuentran a la intemperie. Cabe recordar que la madera es una sustancia higroscópica, influida por los cambios de las condiciones de humedad atmosférica, produciéndose absorción de agua en las superficies que quedan expuestas, hinchándose con clima húmedo y lluvioso y contrayéndose en los períodos de sequía.



Fig. 26. En la imagen se observan termitas de madera seca en pleno ataque a una pieza. (CORMA, 2001).



Fig. 27. Madera oscurecida, degradación por la luz.



Fig. 28. Madera degradada por la humedad.

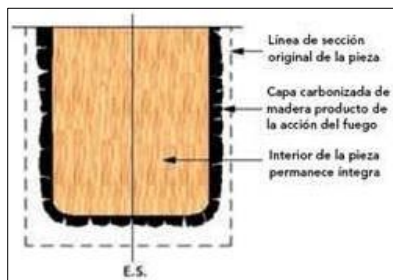


Fig. 29. La capa de carbón producto de la acción del fuego (CORMA, 2001).
actúa como protector.

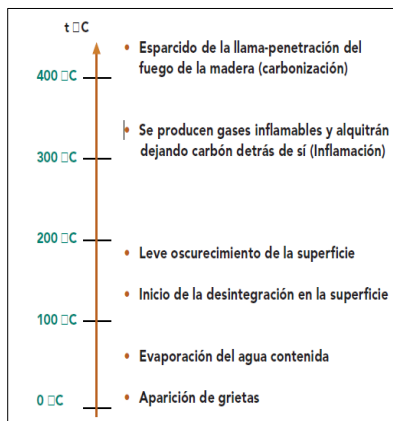


Fig. 30. Comportamiento de la madera frente a la acción del fuego (CORMA, 2001).



Fig. 31. Estructura de madera afectada por la acción del fuego.



Fig. 32. Capa exterior de pieza de madera carbonizada.

En todo caso, la penetración de agua por las razones expuestas es relativamente lenta y no se producen cambios en el contenido de humedad o en el volumen de la pieza, siempre que no haya una condición especial, en que el estado de humedad o sequedad se exceda de lo normal.

Se puede concluir que el daño esperado se concentra en las capas externas de la madera, ya que se producen tensiones alternas de compresión y dilatación que se traducen en una desintegración mecánica de las capas superficiales.

- **Efecto hielo – deshielo:** La humedad contenida en las cavidades celulares se transforma a estado sólido, aumentando el volumen (anomalía del agua) de las fibras leñosas de la madera en estado verde, produciendo un daño en la integridad física del material, lo que puede traducirse en la destrucción de las células ubicadas en la superficie. Si este fenómeno es repetitivo puede afectar la resistencia de la pieza.
- **Fuego:** Es uno de los agentes destructores que ningún material puede tolerar indefinidamente sin presentar algún deterioro. La reacción al fuego de las maderas depende de: Espesor de la pieza de madera, contenido de agua de la madera y densidad de la madera (especie).

La madera está formada fundamentalmente por celulosa (aproximadamente un 44%) y lignina, materiales ricos en carbono, admitiéndose que la madera contiene aproximadamente un 48 % de carbono. La temperatura de inflamabilidad de la madera, en circunstancias favorables, es aproximadamente 275 $^{\circ}\text{C}$, siendo un factor importante el tiempo durante el cual es calentada.

Por debajo de 100 $^{\circ}\text{C}$, casi no se escapa de la madera más que el vapor de agua, incluso si la temperatura externa es superior a 100 $^{\circ}\text{C}$, la de la madera queda igual a 100 $^{\circ}\text{C}$ si el agua no se ha desprendido del todo.

De 100 $^{\circ}\text{C}$ a 275 $^{\circ}\text{C}$ se desprenden gases: CO₂ incombustible, CO combustible y piroleñosos. Hacia los 275 $^{\circ}\text{C}$ la reacción es exotérmica. Los gases se desprenden en abundancia, la proporción de CO₂ disminuye rápidamente y aparecen los hidrocarburos. La madera adquiere un color achocolatado. Por encima de los 350 $^{\circ}\text{C}$ los desprendimientos gaseosos son menos abundantes, pero son todos combustibles.

Más allá de los 450°C el hidrógeno y los carburos constituyen la mayor parte de los gases desprendidos, siendo el residuo sólido carbón de madera, susceptible de quemarse con desprendimiento de gases combustibles.

La temperatura de la madera en el curso de su combustión está comprendida entre los 400°C y 500°C aproximadamente. Esta temperatura es la mínima necesaria para continuar la combustión, por supuesto si existe suficiente oxígeno.

Por otro lado, se ha encontrado que, en edificaciones realizadas con el sistema constructivo de poste y viga, las vigas de grandes secciones transversales atacadas por el fuego sólo han comprometido una superficie carbonizada de pequeño espesor, que cubre y protege la madera no afectada por el fuego. La explicación es la baja conductibilidad térmica de la madera, que transmite una pequeña proporción del calor hacia el interior de ella.



Fig. 33. Estructura de madera carbonizada por la acción del fuego.



Fig. 34. Vigas de madera carbonizadas por la acción del fuego.

Sistema BETA – Reparación de vigas de madera

Cuando un segmento o área de una pieza de madera se encuentra en mal estado y se debe realizar una reparación y/o regeneración de vigas se utiliza el Sistema Beta. El sistema Beta consiste en la sustitución de un área o segmento de la sección completa de madera deteriorada por una sección unida con resina o por compuesto de resinas armado que sea capaz de devolver la capacidad estructural al elemento deteriorado.

Los trozos de viga deteriorados se sustituyen por otros en buen estado adheridos con resina o por una argamasa de resina epoxídica armada y anclada mediante composites de varillas de fibra de vidrio en profundidad a la madera sana. De este modo las tensiones de compresión, tracción y cizallamiento son absorbidas por el elemento reparado como una nueva viga de madera.

Uniones Encoladas o Planas (Sánchez, E., 2013):

Se llaman así a las soluciones que utilizan algún tipo de adhesivo para resolver uniones estructurales o para elaborar productos derivados de la madera. Los adhesivos más utilizados para la madera son los siguientes:

- **Fenol-formaldehído (PF):** es de color marrón oscuro. Se utiliza para la elaboración de tableros de madera. El encolado se debe realizar en caliente, entre 110 y 140°C. Necesita de presión

continúa durante el curado. Es apto para las clases de servicio 1, 2 y 3. Tiene el inconveniente de las emisiones de fenol y formaldehído a la atmósfera.

- **Resorcina-formaldehído (RF) y resorcina-fenol-formaldehído (RFF):** es de color marrón oscuro. La RF sólo es apta para la clase de servicio 1, pero la RFF lo es para todas. Esta última se utiliza para encolar entre sí los listones de madera laminada. Es resistente al fuego.
- **Melamina-urea-formaldehído (MUF):** es transparente. Se debe utilizar para encolados por encima de los 30°C. Es poca apta para la clase de servicio 3, pero es resistente al fuego. Se utiliza para la madera laminada, sustituyendo cada vez más a la resorcina porque tiene similares características (resistencia, comportamiento ante la humedad y el fuego, y envejecimiento) y sin embargo no desprende vapores de fenol.
- **Urea-formaldehído (UF):** es transparente. Solo válida para la clase de servicio 1 (poco apta para la clase 2). Tiene una pobre resistencia a la humedad y al envejecimiento.
- **Poliuretano (PU):** es transparente. Puede ser bicomponente o monocomponente (en este caso, el catalizador es la humedad de la madera). Se puede utilizar para todas las clases de servicio. Tiene una actitud reducida para rellenar las juntas. Resiste bien el fuego. Se utiliza también para la elaboración de madera laminada.
- **Resina epoxi (EP):** es transparente. Son aptas para todas las clases de servicio, pero no son adecuadas para temperaturas superiores a los 50°C. Rellenan muy bien las juntas, y necesitan poca presión de encolado. Sirven para unir madera con otros materiales. Son más caros.
- **Caseína:** es transparente. Solo válida para la clase de servicio 1 (poco apta para la clase 2). Precisa de un fungicida.

El fabricante del adhesivo debe indicar que es apto para uso estructural, las clases de servicio para las que está indicado, las prescripciones de uso y las posibles incompatibilidades. En general, los adhesivos tienen un componente principal que actúa de ligante, de origen orgánico o de síntesis, un endurecedor para acelerar el fraguado, una carga o sustancia que mejora alguna característica del adhesivo (fungicidas, ignífugantes, insecticidas, etc.), y un solvente o vehículo en el que va disuelto el adhesivo, y que puede ser acuoso, orgánico, hidrodispersable, en espuma, etc.

2. Objetivos y Delimitación de la investigación

2.1. Objetivos de la investigación

- Determinar el comportamiento a de las vigas de madera de tipo conífera con uniones entre piezas mediante sistema de rehabilitación BETA con cola sometidas al ensayo de flexión estática.
- Comparar el comportamiento de los seis tipos de unión bajo estudio.
- Establecer el mejor tipo de unión con sistema de rehabilitación BETA de las vigas bajo estudio.

2.2. Delimitación de la investigación

El sistema de rehabilitación BETA de piezas de vigas de madera, presenta una solución interesante y novedosa en cuanto a estética y costos, utilizando como elemento principal una nueva sección del mismo material. Existen muchas estructuras antiguas construidas con vigas macizas de madera, por lo cual sería una solución estructural para la rehabilitación de este tipo de estructuras.

Por otra parte, no se han realizado muchos estudios e investigaciones sobre este tipo de sistema, por lo cual, mediante esta investigación se presenta la posibilidad de tener datos concretos del comportamiento de este tipo de uniones, mediante ensayos en laboratorio y un análisis estadístico.

2.2.1. Delimitación temporal

Esta Investigación estará delimitada temporalmente entre los meses de abril y septiembre de 2019.

2.2.2. Delimitación espacial

El trabajo de investigación se realizará en la ciudad de Valencia, Comunidad Valenciana, España, teniendo como centro la Universitat Politècnica de València.

2.2.3. Delimitación científica

Esta investigación se llevará a cabo en el ámbito de la edificación, específicamente en el estudio de la rehabilitación de estructuras de edificación. Para la realización de este estudio se realizarán cinco (6) ensayos de flexión estática a cinco (6) tipos de perfiles de madera, uno (1) sin corte ni uniones y cinco (5) con uniones, con cola, con una muestra total del treinta y tres (33) piezas.

2.3. Tipos de unión bajo estudio:

1) Unión simple entre caras (figuras 35 y 36):



Fig. 35



Fig. 36

2) Unión simple a 45º (figuras 37 y 38):



Fig. 37



Fig. 38

3) Unión dentada simple (figuras 39 y 40):

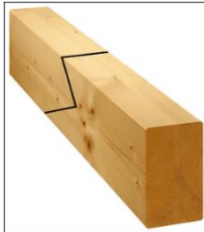


Fig. 39



Fig. 40

4) Unión de quijera (figuras 41 y 42):

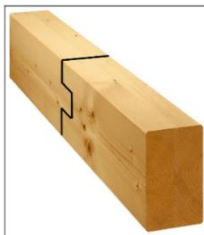


Fig. 41

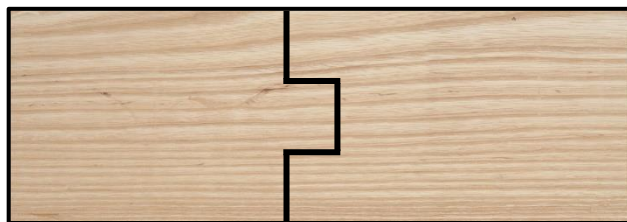


Fig. 42

5) Unión dentada doble (figuras 43 y 44):

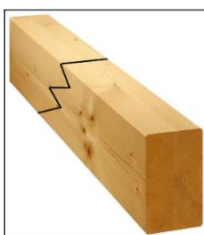


Fig. 43



Fig. 44

3. Plan Experimental

En el Plan Experimental se ha estudiado la resistencia a flexión aplicada en dos puntos de perfiles de madera estructural y la influencia de la geometría de cinco (5) tipos de unión simple con cola. Por lo cual los objetivos principales de este plan de investigación experimental fueron los siguientes:

- Realización del ensayo mecánico a flexión aplicando carga en dos puntos, para determinar las características de la madera a ensayar.
- Analizar la influencia de la geometría de las uniones con cola en la resistencia a flexión de los perfiles de madera.
- Comparar los resultados obtenidos en los ensayos, para determinar el tipo de unión geométrica más adecuando.

3.1. Equipo humano y emplazamiento

El equipo humano que ha formado parte de este trabajo de investigación ha sido el Personal del Laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas.

La selección de materiales, tratamiento de estos, toma de datos y ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universitat Politècnica de València. Por otra parte, la elaboración de la maqueta inicial de investigación, el análisis y procesado de datos de la investigación se realizaron en Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación y la Biblioteca central de la misma universidad.

3.2. Equipo material

3.2.1. Materiales e Instrumentos utilizados en el proceso

Pequeño material y material auxiliar: Para la toma de datos de las vigas (dimensiones generales de la pieza y localización y dimensiones de las singularidades) se ha empleado el siguiente material:

- Escuadras de diferentes tamaños.
- Flexómetro con precisión milimétrica.
- Lápiz.
- Rotulador.
- Sikadur-31 EF (Adhesivo tixotropico a base de resinas epoxi, de dos componentes).
- Paleta metálica.
- Sierra caladora.

- Taladro con punta fina.

3.2.2. Maquinaria para los ensayos

- Máquina IBERTEST para ensayo mecánico a flexión.
- Sierra de mesa.

3.3. Material a ensayar

El material ensayado ha sido suministrado por el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universitat Politècnica de València. En la presente investigación se ensayaron 33 perfiles de madera, específicamente de *Pinus sylvestris* L, ya que es habitualmente utilizada en estructuras de madera. Las dimensiones aproximadas de dichos perfiles eran: 97 mm x 75mm de canto y entre 1695 mm – 2005 mm de longitud en condición seca, dicha madera se puede clasificar en términos de calidad a la ME1 de la norma EN-UNE 56544.

3.4. Metodología general y desarrollo

La metodología aplicada para la realización de la investigación fue la siguiente:

- 1º. Estudio previo bibliográfico, centrado en maderas coníferas estructurales, describiendo su composición básica, características, agentes que la afectan, entre otros.
- 2º. Selección y corte de las piezas en el laboratorio (Inicialmente las piezas componían tablonos, de los cuales se extrajeron 2 perfiles por tablón, los tablonos fueron cortados por la mitad).
- 3º. Marcación de puntos de apoyo según la norma UNE-EN 408:2011 y de los cortes a realizar dependiendo del tipo de unión a realizar (a 1/5 de la luz entre apoyos).
- 4º. Realización de los cortes con sierra de mesa y en algunos casos los cortes fueron realizados con taladro para la realización de orificios y sierra caladora para darle las formas geométricas de las uniones más complicadas (De quijera y dentada doble).
- 5º. Encolado de las piezas con cola Sikadur-31 EF, aplicando presión en los extremos, fijando la unión exteriormente con cinta adhesiva americana y posteriormente aplicando presión con pinzas de mesa y bloques de hormigón, dejándolas en reposo durante un mínimo de 48 horas.
- 6º. Ensayo mecánico a flexión aplicando carga en dos puntos. El puente de ensayo de flexión es el modelo PEF-150-HDA de IBERTEST, con pistón hidráulico y capacidad de carga de 150 kN de carga máxima de ensayo.

7º. Recopilación y análisis de los datos obtenidos en el ensayo mecánico a flexión aplicando carga en dos puntos.

3.4.1. Investigación y estudio bibliográfico

La base inicial del trabajo se basa en la fundamentación teórica relacionada con la madera de tipo conífera adecuada para uso estructural, específicamente centrando el estudio en la reestructuración de vigas de madera aserrada o perfiles macizos, pudiendo ser sustituido un segmento de la sección por otro nuevo. Para ello se consultaron normas, libros, artículos científicos, documentos y sitios web de esta área del conocimiento, todos ellos correctamente citados en la sección de referencias bibliográficas de la investigación. De los documentos consultados y analizados se ha extraído información sobre los siguientes temas:

- Historia de la madera como material estructural.
- Propiedades y características de la madera y madera estructural.
- Defectos propios de la madera y agentes que lo afectan.
- Normativa de madera estructural en España.
- Métodos de clasificación de madera estructural y ensayos destructivos.
- Estructuras de madera y rehabilitación de estas.
- Uniones entre segmentos con la aplicación de cola y su geometría.

3.4.2. Técnicas aplicadas en el estudio

3.4.2.1. Aplicación de la técnica de la clasificación visual

Siendo la madera un material heterogéneo es necesario realizar una correcta clasificación, descartar de manera visual las piezas con defectos e irregularidades que hayan podido afectar los resultados de la investigación, además de la medición de las mismas.

Una vez recopilados los datos anteriormente mencionados y posteriormente analizados se procedió a clasificar los perfiles según la UNE 56544:2011 (tabla 1):

Luego de haber clasificado la madera de manera visual, se procedió a clasificarla con una codificación específica para esta investigación, la nomenclatura utilizada ha sido la siguiente:

- Perfiles sin corte (sección maciza): **S**
- Perfiles con unión recta o perpendicular: **R**
- Perfiles con unión a 45º: **Q**
- Perfiles con unión dentado simple: **V**

- Perfiles con unión dentada doble: **W**
- Perfiles con unión de quijera: **T**

3.4.2.2. Ensayo de la resistencia a flexión axial

Se ensayaron los 33 perfiles con máquina IBERTEST de 150 kN de capacidad de carga, siguiendo los procedimientos y descripciones de la norma UNE EN-408:2010 Para las estimaciones de humedad, densidad, módulos de elasticidad se procedió según lo expuesto en la norma UNE-EN 408:2011 centrado en la determinación de la resistencia a flexión axial (apartado 10) para ensayos de madera estructural. Para posteriormente cotejar los resultados y analizar el comportamiento de los distintos tipos de unión. En la siguiente imagen podemos observar el tipo de ensayo de flexión axial mediante aplicación de carga en dos puntos a realizar (Figura 35):

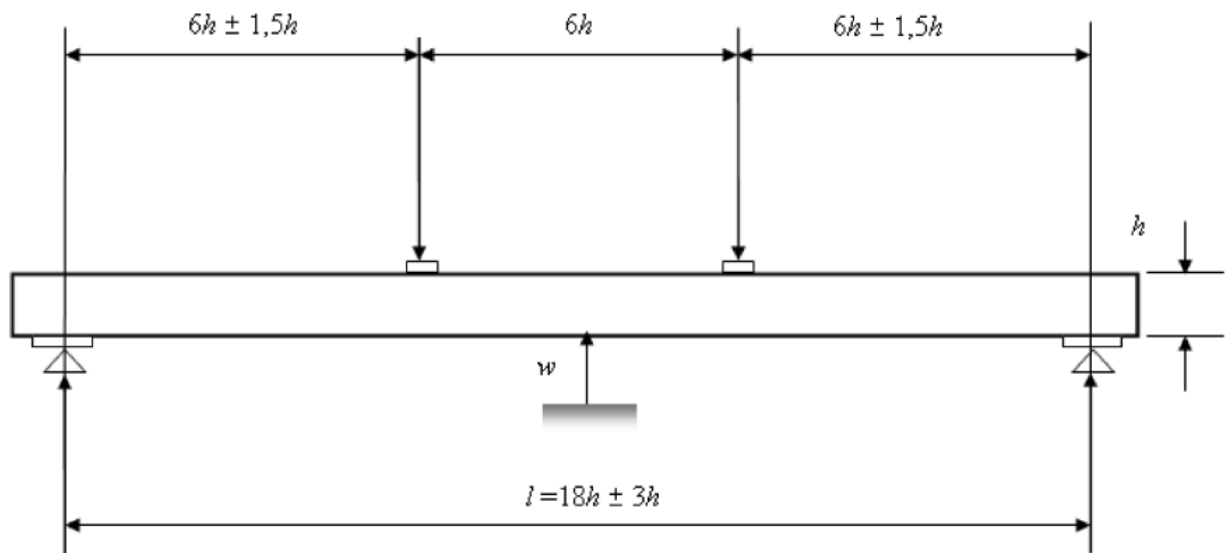


Fig. 45. Dispositivo de ensayo de flexión axial.

4. Resultados de ensayos

Una vez establecidos los criterios correspondientes al plan de ensayos se procedió a la realización de dichas pruebas y a la clasificación de los resultados por grupos, obteniendo las siguientes tablas (siendo los perfiles marcados en color rojo como los peores resultados por grupo y los perfiles marcados en color azul como los mejores resultados por grupo):

PERFILES SIN CORTE (S)						
Nomenclatura Perfil	kN	MPa	kN/mm	D (kg/m3)	Em,g (MPa)	Em,l (MPa)
S2PS109	20.004	46.544	0.87	473	11,731	12,771
S6PS131	20.315	47.265	1.13	577	13,830	15,351
S1PS117	32.990	76.760	1.07	521	12,288	14,423
S4PS124	24.666	57.389	0.98	488	11,986	12,549
S5PS110	25.641	59.659	1.02	580	12,406	14,415

Tabla 1. Resultados generales de perfiles ensayados sin corte.

UNIÓN RECTA O PERPENICULAR (R)						
Nomenclatura Perfil	kN	MPa	kN/mm	D (kg/m3)	Em,g MPa	Em,l (MPa)
R3PS132	13.406	31.193	1.09	557	14,607	15,355
R2PS138	9.786	22.76	1.29	624	15,702	16,649
R4PS118	8.492	19.75	1.13	597	13,348	13,366
R5PS135	11.842	27.55	1.17	569	13,579	14,523
R6PS136	7.030	16.35	1.03	509	11,780	12,483
R1PS120	4.287	9.97	1.07	552	12,251	12,523

Tabla 2. Resultados generales de perfiles ensayados con unión recta o perpendicular.

UNIÓN A 45 GRADOS (Q)						
Nomenclatura Perfil	kN	MPa	kN/mm	D (kg/m3)	Em,g MPa	Em,l MPa
Q1PS104	10.137	23.59	1.08	594	12,104	12,626
Q2PS136	9.356	21.77	1.03	509	11,780	12,483
Q4PS124	10.521	24.48	1.01	488	11,986	12,549
Q5PS123	9.892	23.01	0.98	514	16,590	13,613
Q3PS121	5.581	12.98	0.94	563	12,909	13,839
Q6PS135	10.470	24.34	1.17	569	13,579	14,523

Tabla 3. Resultados generales de perfiles ensayados con unión a 45 grados.

UNIÓN DENTADA SIMPLE (V)						
Nomenclatura Perfil	kN	MPa	kN/mm	D (kg/m3)	Em,g MPa	Em,l MPa
V1PS130	15.988	37.199	1.14	597	13,935	15,214
V6PS110	11.029	25.66	1.08	580	12,406	14,415
V5PS121	11.236	26.14	1.14	563	12,909	13,839
V4PS122	20.233	47.08	0.85	473	10,047	10,703
V3PS130	7.717	17.95	1.17	597	13,935	15,214
V2PS117	8.962	20.85	0.96	521	12,288	14,423

Tabla 4. Resultados generales de Perfiles ensayados con unión dentada simple.

UNIÓN A QUIJERA (T)						
Nomenclatura Perfil	kN	Mpa	kN/mm	D (kg/m3)	Em,g MPa	Em,l MPa
T5PS139	8.566	19.93	0.91	489	10,755	11,543
T4PS139	7.019	16.33	0.92	489	10,755	11,543
T3PS137	9.096	21.16	0.87	467	11,261	11,899
T2PS138	5.528	12.86	0.98	624	15,702	16,649
T1PS123	8.352	19.43	0.88	514	16,591	13,613

Tabla 5. Resultados generales de perfiles ensayados con unión a quijera.

UNIÓN DENTADA DOBLE (W)						
Nomenclatura Perfil	kN	MPa	kN/mm	D (kg/m3)	Em,g MPa	Em,l MPa
W5PS133	8.024	18.66	0.94	524.28	12,209	13,263
W4PS104	13.164	30.62	1.08	593.69	12,104	12,626
W2PS109	9.658	22.47	0.98	472.64	11,731	12,771
W1PS133	5.491	12.77	0.80	524.28	12,209	13,263
W3PS132	9.943	23.13	1.09	557.18	14,607	15,355

Tabla 6. Resultados generales de perfiles ensayados con unión dentada doble.

Siendo:

kN: Fuerza máxima soportada en Kilo newton.

Mpa: Presión máxima soportada en Megapascuales.

kN/mm: Esfuerzo por deformación máxima en Kilo newton por milímetro.

Em,g MPa: Módulo elástico global en flexión.

Em,l MPa: Módulo elástico local en flexión.

5. Análisis de resultados de ensayos

Teniendo las tablas de los resultados organizados procedemos al análisis de estos, en este caso no podemos elaborar un análisis estadístico fidedigno de una población normal (o casi normal) por la escasa cantidad de muestras testeadas y al o tener una muestra poblacional tampoco se pudo realizar una “distribución t de student” para pequeñas muestras, por lo cual utilizaremos un estimadores estadísticos propugnados por la Instrucción del Hormigón EHE, para ensayos de control establecidos en el artículo 88.4, aplicable para análisis de pequeñas muestras; a través de estos estimadores podremos obtener valores característicos para las muestras bajo estudio, con un 95% de probabilidad de que el universo poblacional se encuentre sobre dichos valores.

Procedemos a calcular la media de cada uno de los valores especificados por tabla (tablas 1- 6) y obteniendo la siguiente tabla de medias por grupo:

PERFILES ENSAYADOS	Fuerza máxima (kN)	Presión máxima (Mpa)	Esfuerzo por deformación (kN/mm)	Em,g (Mpa)	Em,l (Mpa)	Fuerza máxima (kN)
PERFIL TIPO S	24.72	57.52	1.01	528	12,448	13,902
PERFIL TIPO R	9.14	21.26	1.13	568	13,545	14,150
PERFIL TIPO Q	9.33	21.69	1.04	539	13,158	13,272
PERFIL TIPO V	12.53	29.15	1.06	555	12,587	13,968
PERFIL TIPO T	7.71	17.94	0.91	517	13,013	13,049
PERFIL TIPO W	9.26	21.53	0.98	534	12,572	13,456

Tabla 7. Media de resultados generales de perfiles ensayados por grupo.

Con los datos de la tabla anterior (tabla 7) podemos observar siguientes gráficas correspondientes a los valores estudiados, para posteriormente ser analizados:

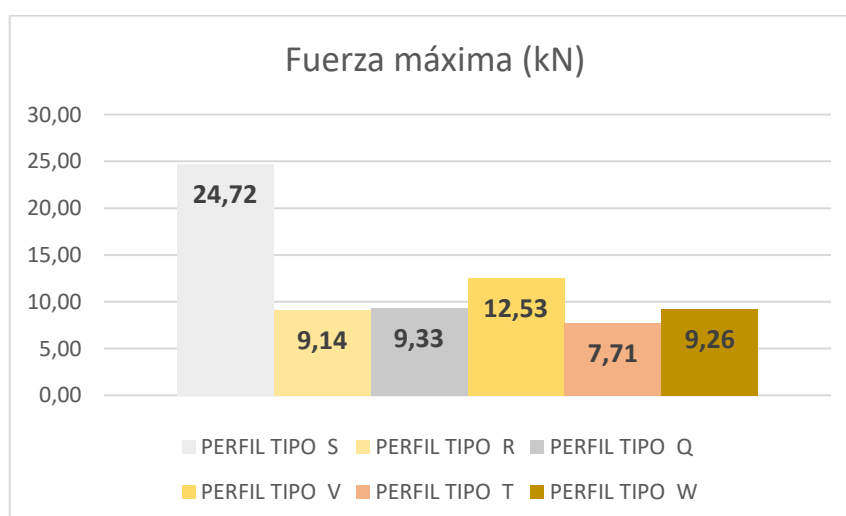


Gráfico 1. Fuerza máxima soportada a la carga aplicada en kN.

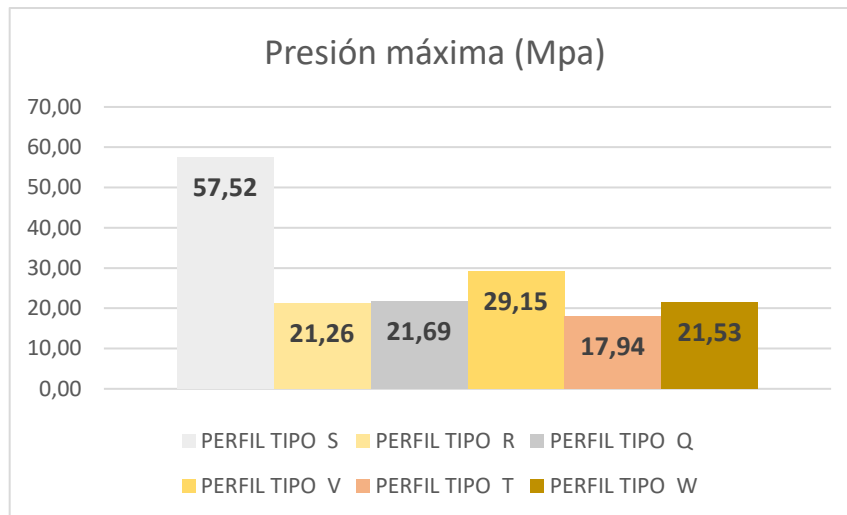


Gráfico 2. Presión máxima soportada a la carga aplicada en Mpa.

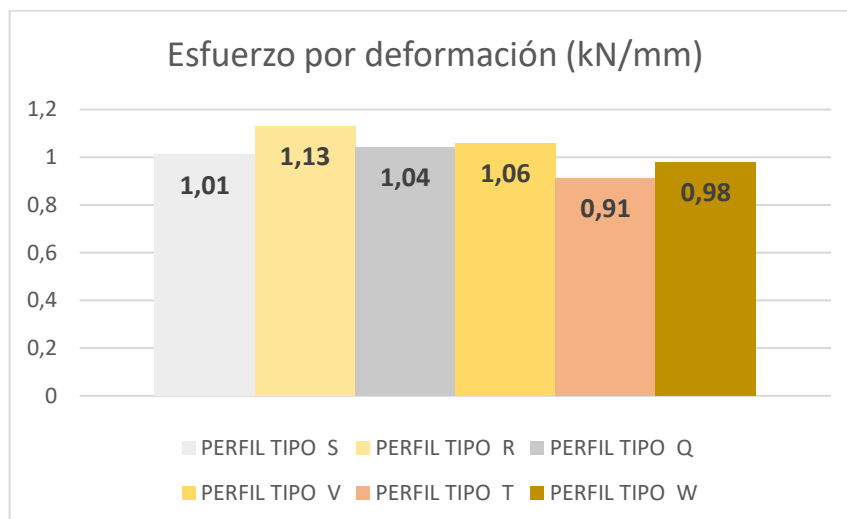


Gráfico 3. Esfuerzo por deformación máximo en kN/mm.

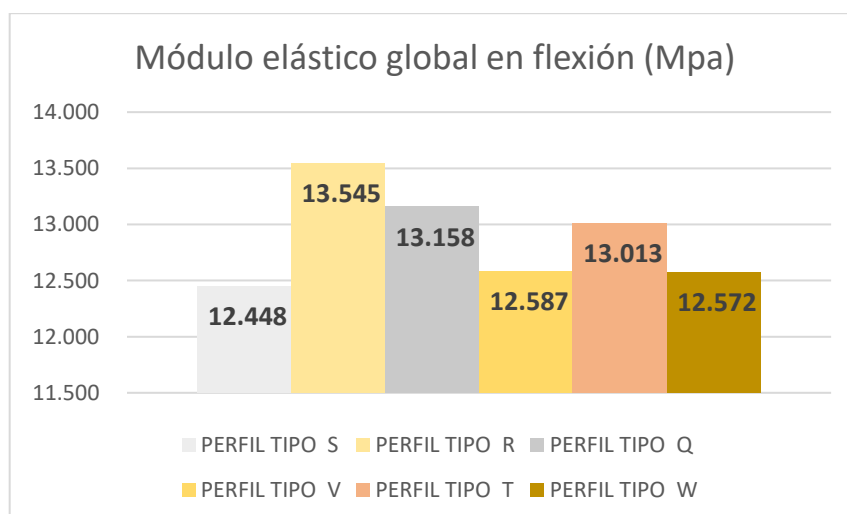


Gráfico 4. Módulo elástico global en flexión máximo en Mpa.

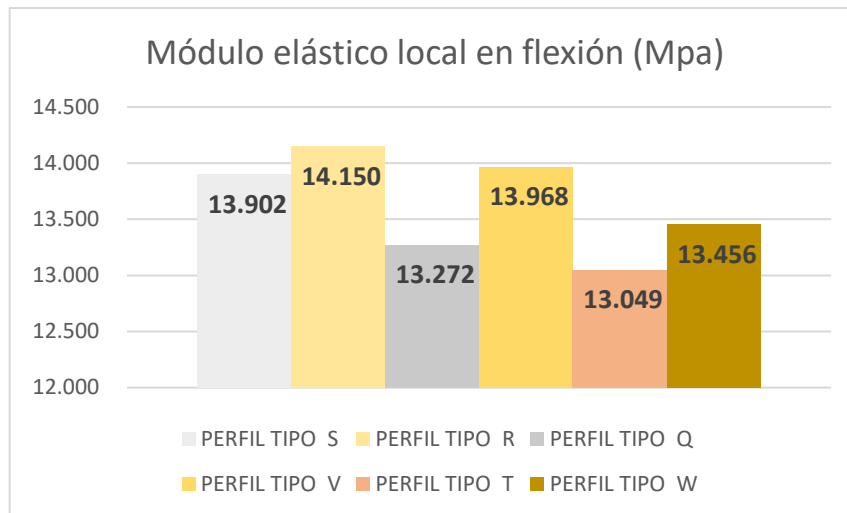


Gráfico 5. Módulo elástico local en flexión máximo en Mpa.

Una vez obtenidos los valores medios por grupo, descritos en la tabla 7, se realizaron los cálculos para determinar la desviación típica, coeficiente de variación y valor característico por grupo mediante el estimador estadístico sugerido por la EHE, artículo 88.4, obteniendo la siguiente tabla (tabla 8):

TABLA DE VALORES ESTADÍSTICOS						
Nomenclatura Perfil	Valores calculados	Fuerza máxima (kN)	Presión máxima (Mpa)	Esfuerzo por deformación (kN/mm)	Em,g (Mpa)	Em,l (Mpa)
Perfiles sin corte (S)	Desviación Típica	5,27	12,25	0,10	816,21	1.198,33
	Coeficiente de Variación	21,3%	21,3%	9,7%	6,6%	8,6%
	Valor característico	22,00 kN	51,20 Mpa	0,90 kN/mm	11.078 Mpa	12.372 Mpa
Perfiles con unión recta o perpendicular (R)	Desviación Típica	3,30	7,67	0,09	1.456,72	1.665,94
	Coeficiente de Variación	36,1%	36,1%	8,1%	10,8%	11,8%
	Valor característico	3,94 kN	9,17 Mpa	1,01 kN/mm	10.837 Mpa	11.640 Mpa
Perfiles con unión a 45 grados (Q)	Desviación Típica	1,88	4,38	0,08	1.811,15	844,43
	Coeficiente de Variación	20,2%	20,2%	7,8%	13,8%	6,4%
	Valor característico	5,13 kN	11,94 Mpa	0,91 kN/mm	10.857 Mpa	12.406 Mpa

Perfiles con unión dentada simple (V)	Desviación Típica	4,71	10,97	0,13	1.436,08	1.684,56
	Coefficiente de Variación	37,6%	37,6%	11,9%	11,4%	12,1%
	Valor característico	7,10 kN	16,51 Mpa	0,78 kN/mm	9.929 Mpa	10.127 Mpa
Perfiles con unión a quijera (T)	Desviación Típica	1,44	3,35	0,04	2.885,28	2.187,27
	Coefficiente de Variación	18,7%	18,7%	4,7%	22,2%	16,8%
	Valor característico	6,86 kN	15,97 Mpa	0,81 kN/mm	11.581 Mpa	11.613 Mpa
Perfiles con unión dentada doble (W)	Desviación Típica	2,81	6,54	0,12	1.154,46	1.099,87
	Coefficiente de Variación	30,4%	30,4%	12,1%	9,2%	8,2%
	Valor característico	8,24 kN	19,16 Mpa	0,87 kN/mm	11.189 Mpa	11.975 Mpa

Tabla 8. Valores estadísticos generales de perfiles ensayados por grupo.

Procedemos a analizar los resultados obtenidos y a compararlos entre ellos:

5.1. Síntesis de resultados obtenidos por grupo de perfiles

Una vez obtenidas las tablas 7 y 8 podemos realizar un análisis del comportamiento de cada grupo de perfiles. Debemos tener en cuenta que los valores de fuerza por desplazamiento en kN/mm fueron calculados antes del momento de rotura, dado que se retiró el dispositivo de medición para evitar la posibilidad de que se deteriorara.

5.1.1. Perfiles sin corte (S)

Estos perfiles de sección maciza, sin cortes ni uniones según el cálculo de sus valores medios obtuvieron los mejores valores en cuanto a resistencia a la fuerza y presión aplicadas, duplicado la resistencia en comparación con las secciones con cortes y uniones. En cuanto a fuerza por desplazamiento y módulo elástico local en flexión tuvo un comportamiento correcto y en el apartado del módulo elástico global en flexión tuvo el peor rendimiento de todos los grupos bajo estudio. Analizando los valores característicos se determinó que obtuvo los mejores resultados en cuanto a resistencia a la fuerza y presión aplicada y al módulo elástico local en flexión. Si observamos los coeficientes de variación podremos observar que todos los valores son inferiores al 25% de desviación. Podemos afirmar que es el grupo de perfiles que tuvo el mejor comportamiento en términos generales.

5.1.2. Perfiles con unión recta o perpendicular (R)

Los perfiles con unión recta o perpendicular según el cálculo de sus valores medios reflejaron unos resultados de resistencia a la fuerza y presión aplicadas aceptables, y obtuvieron los mejores resultados en los apartados de fuerza por desplazamiento, módulo elástico global en flexión y módulo elástico local en flexión; pero si analizamos los datos correspondientes a los valores característicos, podemos observar que este grupo obtuvo los peores resultados en cuanto a la resistencia a la fuerza y presión aplicadas, los mejores resultados de fuerza por desplazamiento y unos valores aceptables en los apartados de módulo elástico global en flexión y módulo elástico local en flexión. Por último, es importante mencionar que los valores correspondientes al coeficiente de variación de la resistencia a la fuerza y presión aplicadas es bastante alto, con un 36,1%.

5.1.3. Perfiles con unión a 45 grados (Q)

El grupo de perfiles con unión a 45 grados en términos generales tuvo buenos resultados en todos los apartados, en ninguno de los casos fue el mejor y/o el peor de los resultados, se puede decir que tuvo un comportamiento correcto en todos los aspectos tanto en valores medios como en valores característicos. En cuanto al coeficiente de variación, su valor máximo fue de 20,2%.

5.1.4. Perfiles con unión dentada simple (V)

Estos perfiles según el cálculo de sus valores medios obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la fuerza y presión aplicadas para secciones con uniones (sin tomar en cuenta los perfiles sin corte), en cuanto a los valores de fuerza por desplazamiento, módulo elástico global en flexión y módulo elástico local en flexión tuvo resultados aceptables. Por otra parte, analizando los valores característicos se pudo observar que presenta los peores resultados en los apartados de fuerza por desplazamiento, módulo elástico global en flexión y módulo elástico local en flexión. Por último, presenta un coeficiente de variación alto para los parámetros de resistencia a la fuerza y presión aplicada, del 37,6% y bajo para los demás parámetros, con una variación máxima del 12,1%.

5.1.5. Perfiles con unión a quijera (T)

Este grupo de perfiles en lo que se refiere a los valores medios, presentó los peores resultados de resistencia a la fuerza y presión aplicadas, fuerza por desplazamiento y módulo elástico local en flexión; Pero si analizamos los valores característicos todos sus valores son aceptables en comparación con las demás secciones, en el caso del módulo elástico global en flexión obtuvo el mejor resultado. Es importante tener en cuenta que coeficiente de variación no supera en ninguno de los casos el 22,2%.

5.1.6. Perfiles con unión dentada doble (W)

El grupo de perfiles con unión dentada doble al igual que el grupo de perfiles con unión a 45 grados, tuvo buenos resultados en todos los apartados de valores medios y valores característicos si lo comparamos con los demás grupos; en ninguno de los apartados presentó el mejor y/o peor resultado. Por último, cabe destacar que los valores de resistencia a la fuerza y presión aplicada tuvieron un alto coeficiente de variación, del 30,4%, en cuanto a los resultados restantes el coeficiente de variación no supera el 12,1%.

5.2. Comparativa de resultados por ítem bajo estudio:

En este apartado se compararán los resultados por parámetros calculados, teniendo en cuenta los valores medios y característicos, pudiendo identificar y analizar los mejores y peores resultados.

5.2.1. Comparativa de fuerza máxima resistida en kilonewton

Como podemos observar en las tablas anteriores (tabla 7 y 8) el grupo de perfiles que obtuvo la mayor resistencia a la carga aplicada en kN fue el de los perfiles **sin corte** (sección maciza sin uniones), el tipo de unión que tuvo el mejor comportamiento fue la **dentada simple (V)** en cuanto a media de resultados, tomando como referencia el valor característico el tipo de unión con mejor comportamiento sería la **dentada doble y** el tipo de unión que obtuvo el peor comportamiento fue la **recta o perpendicular (R)**.

Un dato importante a tener en cuenta es la reducción de la fuerza máxima soportada de los perfiles con uniones frente a las secciones macizas sin corte, la reducción mínima es de un 50% de la carga soportada.

5.2.2. Comparativa de presión máxima resistida en megapascuales

A igual que en la comparativa de la fuerza máxima resistida, la mayor resistencia a la presión aplicada en Mpa fue el de los perfiles **sin corte** (sección maciza sin uniones), el tipo de unión que tuvo el mejor comportamiento fue la **dentada simple (V)** en cuanto a media de resultados, tomando como referencia el valor característico el tipo de unión con mejor comportamiento sería la **dentada doble y** el peor comportamiento lo tuvo la **unión a quijera (T)** en cuanto a media de resultados, pero en base al valor característico el grupo de perfiles con peor comportamiento fueron los de **unión recta o perpendicular (R)**.

5.2.3. Comparativa de fuerza por desplazamiento en kilonewton/milímetros

En cuanto a al desplazamiento por fuerza aplicada el grupo de perfiles que obtuvo el mejor resultado fue el de los perfiles con **unión recta o perpendicular (R)** y el tipo de unión que presentó el peor comportamiento fue el de los perfiles con **unión a quijera (T)** en cuanto a media de resultados, pero tomando en cuenta el valor característico el grupo de perfiles con peor rendimiento en este caso fue el de la unión dentada simple.

5.2.4. Comparativa de módulo elástico global en flexión en magapascasles

En el caso del módulo elástico global en flexión por fuerza aplicada el grupo de perfiles que obtuvo el mejor comportamiento en base a la media de los resultados fue el de los perfiles con **unión recta o perpendicular (R)**, pero si tomamos como referencia el valor característico tendríamos como mejor resultado el grupo de perfiles con **unión a quijera (T)** y el grupo de perfiles el peor comportamiento en este caso fue el de los perfiles **sin corte** (sección maciza sin uniones) en cuanto a media por grupo, en cambio según el valor característico calculado, el grupo de perfiles con peores resultados fue el de la unión dentada simple.

5.2.5. Comparativa de módulo elástico local en flexión en magapascasles

En cuanto al módulo elástico local en flexión el grupo de perfiles que obtuvo el mejor por fuerza aplicada tomando como referencia la media de los grupos fue el de los perfiles con **unión recta o perpendicular (R)**, pero tomando como referencia el valor característico pudimos observar que los mejores resultados los obtuvieron la unión a **45 grados (Q)** y los perfiles **sin corte (s)** con resultados muy próximos, por otra parte el grupo de perfiles que presentó el peor comportamiento para este parámetro en base a las medias grupales fue el de los perfiles **unión a quijera (T)** y en cuanto al valor característico calculado fue el grupo de perfiles con **unión dentada simple (V)**.

5.3. Análisis visual del comportamiento de las muestras y los ensayos

Para el análisis visual de las piezas, empleamos Especificaciones para la clasificación de piezas de madera de coníferas españolas de $b > 70$ mm, recogida en la norma UNE EN 56544. En términos generales, las piezas se encontraban en excelentes condiciones, con presencia de pequeños nudos y sin desperfectos. Realizados los cortes, se obtuvieron las siguientes superficies de contacto por sección (Tabla 9):

Perfiles ensayados	Superficie de contacto encolada (mm ²)
Perfiles con unión recta o perpendicular (R)	7.275
Perfiles con unión a 45 grados (Q)	10.275
Perfiles con unión dentada simple (V)	10.350
Perfiles con unión a quijera (T)	13.275
Perfiles con unión dentada doble (W)	12.600

Tabla 9. Superficies de contacto de piezas encoladas por grupo.

Estas superficies pueden servir como referencia para tener en consideración la cantidad de área encolada y su influencia en el comportamiento de la unión. Sabemos que la cola utilizada (Adhesivo tixotrópico a base de resinas epoxi) tiene una buena adherencia sobre la mayoría de los materiales de construcción y endurece sin retracción, pero no aporta características mecánicas que mejoren el comportamiento de la unión, es decir, no mejora la resistencia a la fuerza aplicada, ni aporta un mayor módulo elástico. Básicamente podemos decir que sólo funciona como puente de unión entre las piezas, mejorando el contacto y adherencia entre ellas.

Conociendo lo anteriormente descrito, se observa en las siguientes imágenes (Figuras 46, 47 y 48) que en los ensayos se utilizó una buena cantidad de adhesivo para garantizar una buena adherencia entre piezas:



Fig. 46. Encolado unión tipo (T).



Fig. 47. Encolado unión tipo (Q).



Fig. 48. Encolado unión tipo (V).

Durante los ensayos se pudo observar que el grupo de perfiles sin corte, es decir, de sección maciza sin unión (S), fue el único grupo que sufrió rotura de fibras visibles en la zona sometida a flexión y colapsó por la zona media de la sección (zona bajo aplicación de carga), en general tuvo el mejor comportamiento, duplicando la resistencia de los perfiles con algún tipo de unión en ciertos parámetros.

Por otra parte, todos los perfiles con unión (R, Q, V, T y W) fallaron en los puntos de las uniones, no tuvieron rotura visible de fibras o fallos en otros puntos de la sección, a excepción de los perfiles con unión a quijera (T) que en algunos casos sufrieron algunas roturas de fibras (rajaduras) en los puntos de unión, probablemente debido al tipo de corte, esto se puede apreciar en la siguiente imagen (figura 49):



Fig. 49. Perfil ensayado con unión a quijera (T) que presenta rajadura.

6. Conclusiones y recomendaciones

- Al analizar los resultados obtenidos en los ensayos podemos afirmar que los perfiles sin corte, ni unión (S) obtuvieron en términos generales los mejores resultados y comportamiento.
- Los perfiles con uniones (R, Q, V, T y W) fallaron por los puntos de unión y no tuvieron roturas de fibras fisibles o colapso en otros puntos de la sección.
- Las uniones que tuvieron mejores resultados en cuanto a resistencia a fuerza y presión aplicadas fueron: la unión dentada simple (según datos medios de resultados por grupo) y la unión dentada doble (según el valor característico calculado).
- Los perfiles que presentaron los mejores resultados en cuanto a fuerza por desplazamiento, módulo elástico global en flexión y módulo elástico local en flexión fueron: los perfiles con unión recta o perpendicular (según datos medios de resultados por grupo) y los perfiles con unión recta o perpendicular, unión a quijera y perfiles sin corte (según el valor característico calculado).
- El grupo de perfiles que obtuvo los peores resultados en términos generales fueron los de unión a quijera (T), es resumen, la unión menos adecuada.
- Los perfiles sin corte como mínimo duplicaron la resistencia a la fuerza y presión aplicada de los perfiles con algún tipo de unión.
- Debido a la poca cantidad de muestras estudiadas se pudieron observar diferencias entre los resultados de los valores medios y los valores característicos por grupo.
- Por último, para futuras líneas de investigación, se recomienda utilizar una mayor cantidad de muestras, preferiblemente mayor a 30 muestras por grupo, de este modo se podría tener una distribución normal y se realizaría un análisis estadístico adecuado, pudiendo obtener datos más precisos y fiables.

Bibliografía

Arriaga, F. (1995). *Eficacia estructural y energética de la madera como material de construcción*. Revista AITIM, 179.

Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M. (2003). *Madera aserrada estructural*. Editorial AITIM, ISBN: 978-84-873-8125-6.

CONFEMADERA. *Construir con madera (CcM)*. Madrid. Fecha de publicación: 2010. ISBN: 978-84-693-1288-9.

Corporación Chilena de la Madera (CORMA). *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Capuz, R. (2003). *Métodos de ensayo no destructivo para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Sánchez, E. (2013). *Construcción de estructuras de madera*. Edición: 1ª. ISBN: 978-84-925-7984-2.

Tablas

Tablas de la 1 a la 9. Elaboración propia.

Figuras

Fig. 1. Cubierta de la [Iglesia de Santa María de Calatañazor](#) (Almazán, Soria). Disponible en: <https://ecovip.es/blog/entramado-ligero-el-sistema-constructivo-en-madera/>

Fig. 2. [Casa de la Madera](#) (Revenga, Burgos). Disponible en: <https://patrimonionatural.org/casas-del-parque/casas-del-parque/casa-de-la-madera>

Fig. 3. Pabellón de Chile, Expo Milán 2015 (Temuco, Chile). Disponible en: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/892049/pabellon-de-chile-expo-milan-2015-undurraga-deves-arquitectos>

Fig. 4. Metrópol Parasol o Setas de Sevilla (Sevilla, España). Disponible en: <https://casadelpoeta.es/las-setas-sevilla-monumento-encanto/>

Fig. 5. Diferencia entre maderas coníferas y Latifoliadas. (GESTIBERIAN, 2016). Disponible en: <http://gestiberian.com/como-diferenciar-los-diferentes-tipos-de-maderas/>

Fig. 6. Estructura anatómica de una madera conífera. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 7. Sección de un árbol. Capuz, R. (2005). *Materiales Orgánicos Maderas*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 84-9705-839-9.

Fig. 8. Entramado de piezas de madera aserrada estructural. (CONFEMADERA, 2010). *Construir con madera (CcM)*. Madrid. Fecha de publicación: 2010.

Fig. 9. Nudos sueltos (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 10. Rajaduras (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 11. Grietas o fendas (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 12. Gemas o canto muerto (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 13. Acebolladuras (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 14. Madera con y sin mantención contra agentes externos (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 15. Madera con presencia de pudrición seca. Disponible en: <https://www.alamy.es/pudricion-seca-o-la-podredumbre-parda-es-un-hongo-decaimiento-de-madera-mostrando-una-decoloracion-marron-y->

[se-agrieta-en-trozos-cubicos-aproximadamente-un-fenomeno-llamado-fractu-cubica-image229349177.html](http://blog.simbolocalidad.com/patologias-madera-tratamiento-image229349177.html)

Fig. 16. Madera con presencia de hongos. Disponible en: <http://blog.simbolocalidad.com/patologias-madera-tratamiento>

Fig. 17. Degradación de la madera. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 18. Piezas de madera machihembrada de Pino Radiata, la que fue atacada por hongos cromógenos estando encastillada. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 19. Estructura anatómica de una especie conífera con hongos que se alimentan de la pared celular. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 20. Pieza 1 atacada por hongos de pudrición. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 21. Pieza 2 atacada por hongos de pudrición. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 22. Insecto cerambícido que ataca la madera. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 23. El líctido sólo ataca latifoliadas. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 24. El anóbido se alimenta de celulosa y lignina. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 25. En la imagen se observan termitas subterráneas en pleno ataque a una solera de un tabique. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 26. En la imagen se observan termitas de madera seca en pleno ataque a una pieza. (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 27. Madera oscurecida, degradación por la luz. Disponible en: <http://protecciondelamadera.com/la-degradacion-y-envejecimiento-de-la-madera-de-uso-en-muebles-cuando-le-ataca-la-luz/>

Fig. 28. Madera degradada por la humedad. Disponible en: https://es.123rf.com/photo_72188962_la-destrucci%C3%B3n-de-la-madera-de-la-humedad.html

Fig. 29. La capa de carbón producto de la acción del fuego (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 30. Comportamiento de la madera frente a la acción del fuego (CORMA, 2001). Corporación Chilena de la Madera. *Manual la construcción de viviendas en madera*. Fecha de publicación: 2001.

Fig. 31. Estructura de madera afectada por la acción del fuego. Disponible en: <http://www.noticiashabitat.com/2014/el-fuego-de-la-madera/>

Fig. 32. Capa exterior de pieza de madera carbonizada. Disponible en: <https://www.bhaus.es/falsos-mitos-de-la-madera-5-de-6/>

Fig. 33. Estructura de madera carbonizada por la acción del fuego. Disponible en: <http://www.noticiashabitat.com/2017/evaluacion-y-rehabilitacion-de-madera-estructural-afectada-por-el-fuego/>

Fig. 34. Vigas de madera carbonizadas por la acción del fuego. Disponible en:

<https://jordimarrot.blogspot.com/2013/11/comportamiento-de-las-vigas-de-madera.html>

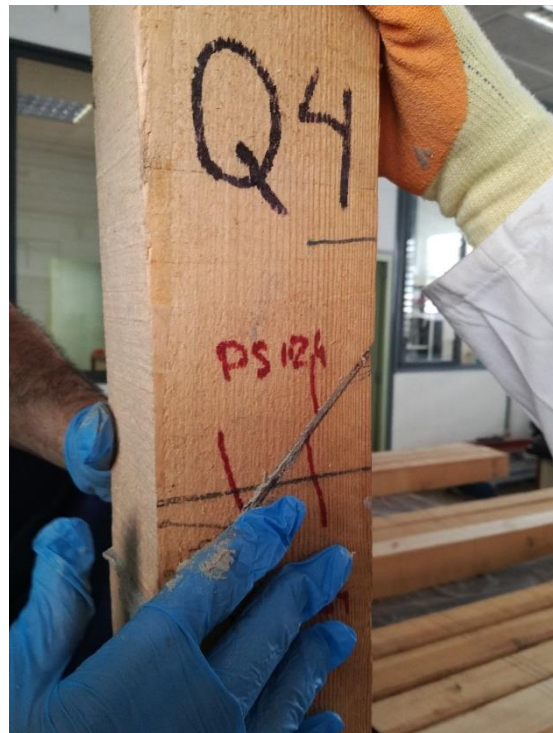
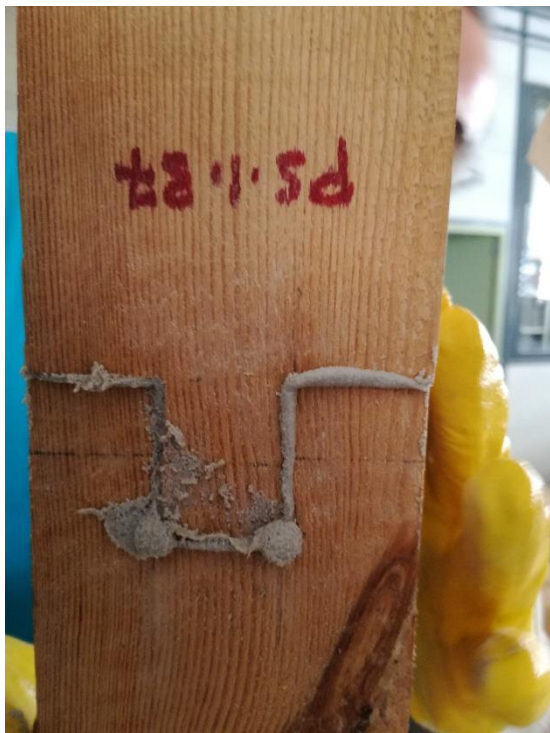
Figuras de la 35 a la 49. Elaboración propia.

Gráficos

Gráficos del 1 al 5. Elaboración propia.

ANEXOS

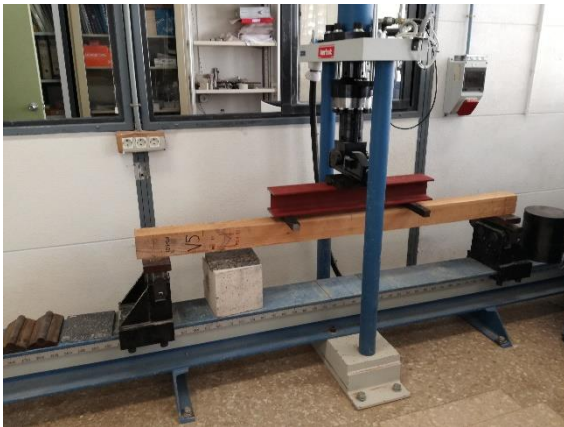
A.1. Fotos de proceso de encolado y unión de elementos

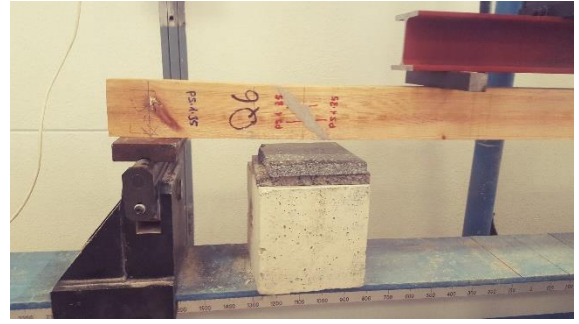




A.2. Fotos de ensayos de flexión axial aplicado en dos puntos







A.3. Tabla de Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ mm

CRITERIOS DE CALIDAD		MEG
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 2/3$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO ⁽¹⁾		
– Pino silvestre		Sin limitación
– Pino laricio		Sin limitación
– Pino gallego y pinaster		Sin limitación
– Pino insigne (radiata)		Sin limitación
FENDAS	De secado ^{(2) (3)}	$f \leq 3/5$ Las fendas de contracción sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.
	– Rayo	No permitidas
	– Hieladura	
– Abatimiento		
ACEBOLLADURAS		No permitidas
BOLSAS DE RESINA y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor o igual que $1,5 \cdot "h"$
MADERA DE COMPRESIÓN		Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1:6 (16,7%)
GEMAS		
– longitud		$\leq 1/3$ de "L"
– dimensión relativa		$g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS		
– Muérdago (<i>V. album</i>)		– No se admite
– Azulado		– Se admite
– Pudrición		– No se admite
– Galerías de insectos xilófagos		– No se admiten
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4) (5)}		
– Curvatura de cara		20 (10) mm (para una longitud de 2 m)
– Curvatura de canto		12 (8) mm (para una longitud de 2 m)
– Alabeo		2 (1) mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
– Abarquillado		sin limitación
(1) Estos criterios sólo se consideran cuando se comercializa en húmedo.		
(2) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo.		
(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad.		
(4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.		
(5) Se toman los valores más exigentes indicados entre paréntesis, cuando la calidad MEG de lugar a una clase resistente superior a C18.		

A.4. Cálculo de valor característico para pequeñas muestras (apuntes clase de intervención en estructura de hormigón. Capítulo III, Página 14, Prof. Javier Benlloch Marco)

Por otra parte, como segundo método, se puede estimar la resistencia característica conforme al método propugnado por la Instrucción del Hormigón EHE, para ensayos de control establecidos en el artículo 88.4., que, de forma resumida, cuando el número de amasadas es mayor o igual que 6 se obtiene mediante la expresión:

$$f_{ck,est.} = 2 \cdot \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{m-1}}{m-1} - x_m \geq K_N \cdot x_1 \quad (Ec.17)$$

habiendo ordenado los resultados de las amasadas de menor a mayor ($x_1 < x_2 < x_3 \dots$) Siendo K_N el coeficiente dado en la tabla 8, tomado del cuadro 69.3.2.b. de la IEH-91¹, para el caso de hormigonado en otros casos distintos al hormigonado en central; m es el número de amasadas dividido por 2 ($m = N/2$) si este número es par y $m = (N-1)/2$ si es impar.

HORMIGONADO FUERA DE CENTRAL	
Número N de amasadas con Resultados	Valor del coeficiente K_N
2	0,75
3	0,81
4	0,86
5	0,89
6	0,92
7	0,94
8	0,96

Tabla 8. Valor de K_N para control del hormigón.

Caso que el número de amasadas con resultado de control sea menor de 6, el estimador estadístico empleado es distinto:

$$f_{ck,est} = K_N \cdot x_1 \quad (Ec.18)$$

con los mismos significados que en la ecuación 17.

El primero de los procedimientos descritos, el método estadístico, supuesta una distribución normal, se emplea cuando el número de resultados lo hace viable; en general con un número de resultados superior a seis (sería preferible pensar en doce). Su acuerdo con el método propugnado por EH-91 es muy satisfactorio, siempre y cuando el coeficiente de variación de la resistencia se sitúe alrededor de 0,20 a 0,23.

Respecto de la pertinencia del empleo del método propugnado para el control del hormigón por la Instrucción EH-91, es interesante reproducir el comentario que la propia Instrucción realiza a su artículo 69.3.2. "Ensayos de control a nivel normal"²:

- 1 Se ha tomado el valor de la IEH-91, con un nivel de confianza del 95% mientras que el dado en la Instrucción EHE, tabla 88.4.b., es del 97,5%; por considerarlo más congruente con el razonamiento dado.
- 2 Lamentablemente este comentario, de gran interés, ha desaparecido en la instrucción EHE-08, mucho más preocupada por catalogar las centrales de hormigonado en función de la dispersión de sus resultados ("recorrido relativo máximo. r").